

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ КАК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Багин Д.Н., Коняев А.Ю.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: a.u.konyayev@urfu.ru

Аннотация — Показана необходимость рассмотрения электродинамических сепараторов как сложных электромеханических систем. Приведены примеры расчета сепаратора на основе трехфазного линейного индуктора с учетом совместного действия электромагнитных и механических сил. Достоверность расчетов подтверждена сравнением с данными эксперимента.

Ключевые слова — электродинамический сепаратор, системный подход, пример расчета.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка твердых отходов производства и потребления превратилась в последние десятилетия в самостоятельную отрасль промышленности [1-2]. Современным эколого-экономическим требованиям (минимизация воздействия на окружающую среду, ресурсо- и энергосбережение) более всего удовлетворяет комплексная переработка, предполагающая разделение отходов на фракции с последующей утилизацией полученных компонентов наиболее подходящими методами. Поэтому разработка новых технологий и технологического оборудования для механизации операций по сортировке отходов является актуальной. В частности, одной из задач является создание установок электродинамической сепарации для выделения из твердых отходов лома цветных металлов, а также сортировки лома при подготовке его к металлургическому переделу. Извлечение из отходов металлических включений позволяет получить сырье для вторичной цветной металлургии и обеспечивает безаварийную работу технологического оборудования, перерабатывающего отходы, а также надлежащее качество получаемых при этом товарных продуктов. Предварительная сортировка металлолома необходима для уменьшения потерь металла, снижения энергоемкости последующих металлургических операций и для обеспечения возможности получения из вторичного сырья кондиционных сплавов.

В зарубежной практике для решения указанных задач чаще всего используются электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем [1-3]. В нашей стране случаи использования электродинамических сепараторов единичны, а предлагаемые некоторыми производителями установки позволяют решать только узкий круг задач. Во многом такое положение объясняется слабой теоретической проработкой

процессов электродинамической сепарации и отсутствием методик их расчета. Научные исследования, выполняемые на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы» Уральского федерального университета, направлены на исправление такой ситуации – на создание математических моделей электродинамических сепараторов и процессов сепарации, а также на создание методик их расчета и проектирования. В данной работе обсуждается необходимость и возможность рассмотрения электродинамических сепараторов при их расчетах и проектировании как сложных электромеханических систем.

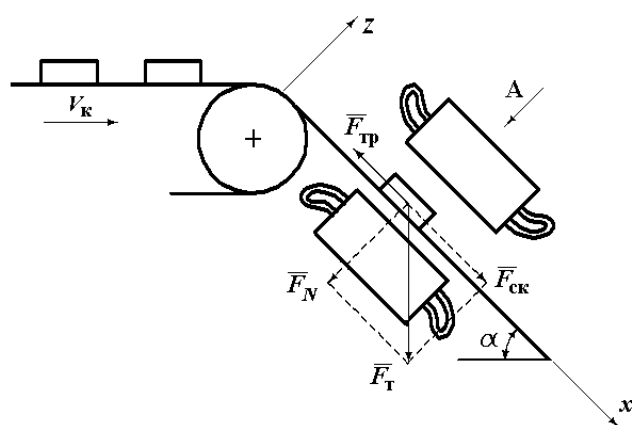
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СЕПАРАТОРОВ

В зависимости от решаемой технологической задачи и производительности установок электродинамической сепарации могут применяться различные индукторы, отличающиеся способом возбуждения бегущего магнитного поля: трехфазные линейные индукторы (как правило, работающие на частоте 50 Гц); индукторы с вращающимися постоянными магнитами или электромагнитами (достигаются частоты от 100 до 800 Гц); индукторы с модуляцией поля, получаемой, например, при вращении в поле постоянного магнита (электромагнита) стального зубчатого ротора (частота модулированной составляющей магнитного поля 1–3 кГц). Кроме того установки электродинамической сепарации отличаются способами подачи и отвода материалов. Можно выделить четыре основные группы сепараторов:

- с подачей материалов в свободном падении;
- с подачей материала по ленте конвейера и выходом проводящей фракции в сторону от него;
- с подачей материала по наклонной плоскости и отводом выделяемых продуктов в сторону от потока.
- сепараторы шкивного (барабанного) типа, в которых извлекаемые проводящие тела выбрасываются по параболической траектории.

В качестве примера на рис. 1 схематично показан электродинамический сепаратор на основе двухстороннего линейного индуктора с подачей сепарируемых материалов по наклонной плоскости. Сепарируемый материал поступает в активную зону индуктора по линии подачи. При взаимодействии

проводящих частиц с бегущим магнитным полем развивается электромагнитное усилие, которое заставляет такие частицы отклоняться в сторону движения поля. При этом траектория частиц и итоговое их отклонение от линии подачи зависят от совместного действия на частицу электромагнитных и конкурирующих с ними механических сил, схематично показанных на рис. 1. Поэтому при расчетах и проектировании такой сепаратор необходимо рассматривать как электромеханическую систему, в которой конечный результат (извлечение металлов из отходов, сортировка металлов с разными физическими свойствами) зависит от совместного действия как электромагнитных, так и механических сил.



Вид А

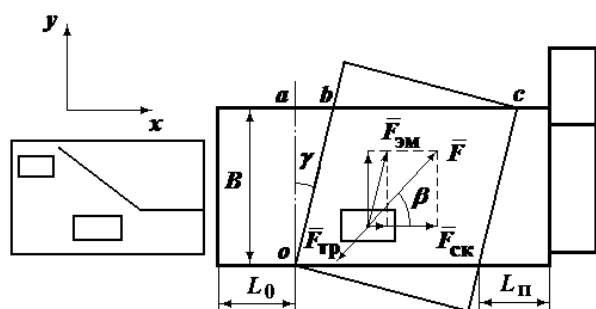


Рис. 1. Сепаратор с подачей материалов по наклонной плоскости и схема сил, действующих на извлекаемую проводящую частицу

В рамках такого системного подхода в УрФУ разрабатываются математические модели и методы расчета характеристик электродинамических сепараторов [3]. На первом этапе проектирования сепараторов рассчитываются магнитное поле, создаваемое в зоне сепарации, вторичные токи, наводимые в проводящих предметах и, как результат, определяется электромагнитное усилие, действующее на эти предметы [4]. На основании таких электромагнитных расчетов выбирается конструкция индуктора и с учетом заданного теплового режима работы рассчитываются его

параметры (размеры, полюсное деление, геометрия зубцовой зоны, обмоточные данные). Расчеты выполняются из условия достижения требуемого значения удельного электромагнитного усилия извлечения ($F_m = F/m$ – отношения электромагнитного усилия к массе частиц, Н/кг или м/с). В случаях, когда установка создается на основе готового индуктора или при наличии ограничений по габаритам или мощности индуктора, определяются максимально возможные значения F_m .

На втором этапе рассчитываются процессы массопереноса с учетом действия на извлекаемые проводящие предметы как электромагнитных, так и механических сил. Характер и величина конкурирующих механических сил (силы трения, гравитации, центробежные, сопротивления среды и т.п.) во многом зависят от способов подачи сепарируемого материала в зону сепарации и отвода продуктов разделения. Поэтому на выходе второго этапа проектирования определяются конструкция и параметры механической части установок электродинамической сепарации. Например, для конструкции электродинамического сепаратора, показанной на рис. 1, определяются такие параметры, как: скорость подачи в установку разделяемых частиц – V_k ; размеры наклонной плоскости (L_0 – расстояние от точки подачи материала на плоскость до активной зоны индуктора, L_{II} – расстояние от индуктора до приемников продуктов разделения); угол наклона плоскости – α ; угол поворота индуктора – γ . Условиями выбора параметров установки служат достижение требуемых траекторий движения частиц и необходимого отклонения их от линии подачи материала.

Достоинством рассматриваемого подхода к расчету электродинамических сепараторов является получение в результате расчетов оценок конечного результата: отклонения частиц с разными физическими свойствами от линии подачи, показывающие возможность извлечения металлических частиц из сыпучих смесей, либо возможность видовой сортировки металлов.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Покажем возможности принятого подхода на примере расчета лабораторной установки электродинамической сепарации на основе трехфазных линейных индукторов, предназначенной для сортировки лома и отходов медных сплавов. В установке используется подача материалов в зону сепарации по наклонной плоскости, как показано на рис. 1. Параметры двухстороннего двухполюсного линейного индуктора: полюсное деление $\tau = 180$ мм; длина активной зоны $2\pi\tau = 360$ мм; ширина активной зоны $L_{II} = 125$ мм; немагнитный зазор $\delta = 30$ мм; потребляемая из сети мощность $S = 3,8$ кВА; при среднем токе в фазах обмотки $I_1 = 7,9$ А в центре активной зоны достигается амплитуда магнитной индукции $B_m = 0,12$ Тл. Механические параметры системы: скорость сепарируемого материала на входе в сепаратор $V_k = 0$ м/с; угол наклона плоскости изменяется в пределах $\alpha = (20 - 45)^\circ$; удаление точки подачи от входного края индуктора $L_0 = 0$ мм; расстояние от выходного края индуктора до приемников

$L_n = 450$ мм; угол поворота индуктора $\gamma = 0^\circ$; коэффициент трения, подтвержденный экспериментально $k_{тр} = 0,3$. Исследовалась возможность сортировки в рассматриваемом сепараторе сплавов латуни: Л90 (удельная электропроводность – $25 \cdot 10^6$ См/м, плотность – $8,85$ г/см³) и Л63 ($14,5 \cdot 10^6$ См/м, $8,47$ г/см³ соответственно). Расчеты проведены для пробных пластин с размерами $a \cdot b \cdot d = 40 \cdot 40 \cdot 3$ мм, предоставленных предприятием – заказчиком.

На первом этапе по методике, приведенной в [4], рассчитывались удельные электромагнитные усилия, действующие на пластины латуни в активной зоне индуктора (формулы для расчета усилий не приводятся из-за громоздкости). При указанных параметрах линейного индуктора в расчетах получено: для сплава Л90 – $F_m = 6,16$ Н/кг; для Л63 – $F_m = 3,75$ Н/кг. С учетом того, что скорость движения пластин в активной зоне не превышает 1 м/с и существенно меньше скорости бегущего магнитного поля, можно полагать скольжение $s \approx 1,0$ и в последующих расчетах считать удельные электромагнитные усилия неизменными.

На втором этапе рассчитываются отклонения пластин от линии подачи в конце наклонной плоскости (в месте расположения приемников продуктов разделения). В [3] на основе решения уравнений движения пластин под действием электромагнитной и механических сил получены выражения для расчета указанного отклонения, связывающие механические параметры установки и удельное электромагнитное усилие (для случая $\gamma = 0^\circ$):

- отклонение пластин при движении в активной зоне индуктора

$$B = (F_m - k_{mp} \cdot g \cdot \cos \alpha) \cdot \frac{t_u^2}{2}, \quad (1)$$

где g – ускорение земного притяжения; t_n – время пребывания пластин в активной зоне индуктора; a_x – ускорение пластины под действием скатывающей силы

$$t_u = \frac{\sqrt{V_k^2 + 2 \cdot (L_0 + L_u) \cdot a_x} - \sqrt{V_k^2 + 2L_0 \cdot a_x}}{g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha)}, \quad (2)$$

$$a_x = g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha); \quad (3)$$

- отклонение пластин при движении их по инерции за индуктором

$$B_n = [F_m \cdot t_u - g \cdot k_{mp} \cdot (t_u + t_n) \cdot \cos \alpha] \cdot \frac{t_n}{2}, \quad (4)$$

где t_n – время движения пластин по плоскости за индуктором

$$t_n = \frac{\sqrt{V_k^2 + 2 \cdot (L_0 + L_u + L_n) \cdot a_x} - \sqrt{V_k^2 + 2 \cdot (L_0 + L_u) \cdot a_x}}{g \cdot (\sin \alpha - k_{mp} \cdot \cos \alpha)}. \quad (5)$$

Результирующее отклонение извлекаемых частиц от линии подачи определяется суммированием (1) и (4)

$$B_{рез} = B + B_n. \quad (6)$$

На рис. 2 представлены рассчитанные по (1) – (6) отклонения от линии подачи $B_{рез}$ проводящих пластин из Л90 и Л63 в зависимости от угла наклона плоскости подачи α . Рисунок иллюстрирует возможность решения поставленной задачи сортировки медных сплавов. Например, при угле наклона плоскости подачи $\alpha = 30^\circ$ разделитель потока сепарируемых материалов может располагаться в конце плоскости на расстоянии $0,3$ м от линии подачи.

Для оценки достоверности расчета на рис.2 показаны данные эксперимента. Сравнение показывает хорошее качественное совпадение кривых. Количественное расхождение результатов расчета и эксперимента не превышает $20-25\%$, что для задачи, в которой конечный результат определяется множеством случайных факторов, вполне приемлемо.

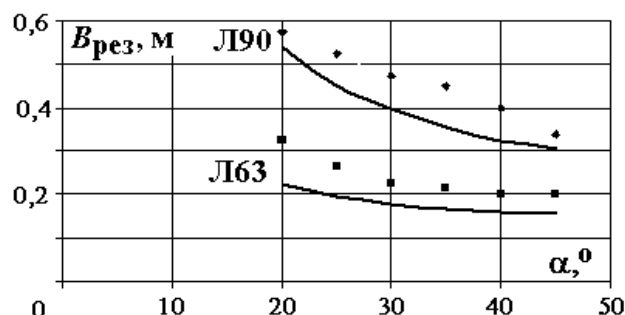


Рис.2. Отклонения металлических пластин от линии подачи в зависимости от угла наклона плоскости: сплошные линии – расчет, точки – эксперимент

Предложенный подход и методики расчета позволяют оценивать влияние различных параметров электродинамических сепараторов на их характеристики. Пример такой оценки показан на рис. 3. Расчеты выполнены для пробных пластин из сплава Л90 ($F_m = 6,16$ Н/кг) с размерами $a \cdot b \cdot d = 40 \cdot 40 \cdot 3$ мм при неизменных значениях остальных параметров ($\alpha = 30^\circ$; $L_n = 450$ мм; $\gamma = 0^\circ$; $k_{тр} = 0,3$). Нетрудно видеть заметное уменьшение результирующего отклонения извлекаемых пластин от линии подачи с повышением скорости. Это объясняется тем, что с ростом V_k и L_0 увеличивается скорость входа пластин в зону сепарации и уменьшается время их взаимодействия с бегущим магнитным полем.

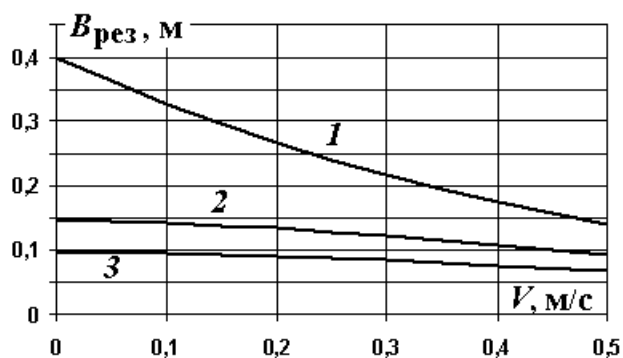


Рис.3. Зависимость отклонения извлекаемых пластин от скорости подачи материала V_k при разных значениях L_0 (0; 0,05; 0,10 м – цифры 1-3 соответственно)

На основании подобных оценок можно сформулировать требования к устройствам подачи материала (использование минимальной скорости подачи, определяемой заданной производительностью установки) и к конструкции лобовой части обмоток индуктора, от которой зависит значение L_0 .

Предложенная методика расчета сепаратора позволяет решать и обратную задачу: снижение энергопотребления электродинамических сепараторов за счет оптимизации параметров механической части установки. Например, на рис. 4 приведены расчетные значения требуемого удельного электромагнитного усилия (F_m) в зависимости от значения L_n для углов наклона плоскости подачи 30° и 45° .

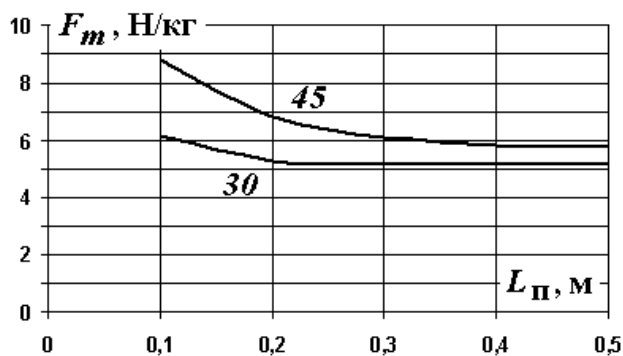


Рис.3. Снижение требуемого электромагнитного усилия при изменении L_n для разных значений угла наклона плоскости подачи (30° и 45°)

Как видно из рис. 4, снижение требуемого электромагнитного усилия (следовательно, и мощности трехфазного линейного индуктора) достигается с уменьшением угла наклона плоскости подачи α (извлекаемые частицы дольше находятся в активной зоне индуктора) и с увеличением размера плоскости за индуктором L_n (полезно используются силы инерции). В то же время можно отметить, что существуют

рациональные значения размера L_n . Например, при $\alpha = 30^\circ$ увеличение размера плоскости нецелесообразно, так как не приводит к снижению F_m , а лишь увеличивает габариты установки.

Уменьшение угла наклона плоскости подачи ограничивается триботехническими свойствами материала плоскости. Для используемой в лабораторной установке плоскости из стеклотекстолита угол трения составлял $17-18^\circ$. Поэтому при угле наклона $\alpha < 20^\circ$ установка становится неработоспособной из-за застревания материала на плоскости. Дальнейшее улучшение характеристик электродинамического сепаратора за счет изменения α возможно при принятии мер по снижению сил трения (например, при замене стеклотекстолитовой плоскости на стеклянную или применении вибрации наклонной плоскости).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье показана необходимость рассмотрения электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем как сложных электромеханических систем. Построенная в рамках системного подхода на основе взаимосвязанных математических моделей электромагнитных процессов и процессов массопереноса методика расчета сепаратора позволяет оценивать влияние различных параметров сепаратора на конечный результат. Появляется возможность оценки принципиального решения технологической задачи (извлечения цветных металлов из смесей материалов или видовой сортировки металлических отходов), а также возможность получения на стадии проектирования рекомендаций по выбору конструкции и параметров как электромагнитной, так и механической частей электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шубов Л.Я., Технология отходов / Л.Я. Шубов, М.Е. Ставровский, А.В. Олейник – М.: Альфа-М, Инфра-М, 2011. 352 с.
2. Колобов Г.А., Сбор и обработка вторичного сырья цветных металлов / Г.А. Колобов, В.Н. Бредихин, В.М. Чернобаев - М.: Металлургия, 1993. 288с.
3. Коняев А.Ю., Электродинамические сепараторы с бегущим магнитным полем: основы теории и расчета / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров, Н.Е. Маркин. – Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2012. 104 с.
4. Коняев А.Ю., Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // Электротехника, 1998, №5, с.52-57.